第65卷 第2期
2024年3月
天 文 学 报
ACTA ASTRONOMICA SINICA
Vol. 65 No. 2
Mar., 2024
doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.02.002

基于数值模拟的大口径高精度射电望远镜台址风障优化设计研究*

何飞龙[1,2]　许　谦[1,3,4†]　王　娜[1,3,4]　李　琳[5]　黄释怡[6]

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)
(2 中国科学院大学 北京 100049)
(3 中国科学院射电天文重点实验室 乌鲁木齐 830011)
(4 新疆射电天体物理重点实验室 乌鲁木齐 830011)
(5 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)
(6 西华师范大学物理与天文学院 南充 637002)

摘要　随着射电望远镜口径增大、观测频率提高, 对其指向精度的要求也越来越高. 然而, 望远镜服役于野外台站, 台址风扰对天线指向精度的影响在高频段观测时已不能忽略. 由于风扰的时变性, 现有的抗风方法无法保障大口径高指向精度望远镜在高频段的有效观测时长. 因此, 提出了一种基于风障精确布置改善台址风环境的方法. 通过数值模拟构建了风障仿真模型, 并将仿真结果与风洞实测数据比较, 两种孔隙率风障的平均误差分别为3.7%和6.1%, 保证了风障模型的可靠性. 以新疆奇台射电望远镜(QiTai radio Telescope, QTT)台址为例, 基于QTT台址斜坡地形构建了计算域模型, 开展单风障不同高度、不同孔隙率的系列风场仿真试验, 得到了风障参量与下游挡风效果的关系. 基于单风障合理高度和最优孔隙率设置南北风障, 仿真结果表明在确定高度下最优孔隙率可以组合, 孔隙率0.1–0.1组合的风障挡风效果最优, 南方向来风在天线区域可以有效降低75%以上的风速.

关键词　望远镜, 方法: 数值, 台址, 风障, 风场调控
中图分类号: P112;　**文献标识码**: A

1　引言

天线露天工作时, 观测性能将不可避免地受到台址风扰的影响. 口径越大, 观测频段越高, 天线指向精度受风扰的影响也就越敏感. 美国GBT (Green Bank Telescope) 100 m天线馈源臂的抖动与风速之间存在较强的相关性, 天线最高指向精度也严重受限于当前的环境风速[1–2]. 中国科学院新疆天文台正在建造奇台射电望远镜(QiTai radio Telescope, QTT), 其为全可动射电望远镜, 口径110 m, 最高目标频率115 GHz, 指向精度要求高

2022-11-15收到原稿, 2022-12-12收到修改稿
*国家自然科学基金项目(12103083、12273102), 中国科学院青年创新促进会项目(Y202019), 国家重点研究计划(2021YFC2203601), 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01B111、2022D01B72), 陕西省天线与控制技术重点实验室开放基金及中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项资助
†xuqian@xao.ac.cn

于2.5″[3]. 像QTT这类大口径、高指向精度的望远镜, 天线自身技术指标的实现本就不易, 然而由于台址环境载荷的影响, 特别是风扰会导致高频观测有效时长受到限制. 风扰具有时变性和随机性, 已成为外在干扰因素中最复杂、最难以解决的问题之一. 当前主要的天线抗风方法有: 建天线罩[4]、网状反射面设计[5]、控制补偿[6]等. 对大口径、高精度望远镜, 修建天线罩工程造价高昂, 难以实现; 高频观测采用网状反射面产生电磁波透射; 控制补偿本质上也是被动调控, 面对时变风扰常常难以进行实时控制, 进而无法保障指向精度.

以QTT台址为对象, 对其地形和来风特性的研究发现, 来风频率高、来风风速相对较大的方向多位于天线外围山体豁口处[7]. 如果在上游风口精确布置挡风设施, 将可以有效降低天线区域来风风速. 当前主要的挡风设施有防风网、防风林、防风墙等. 它们多用于港口物料堆场[8]、道路桥梁[9]、沙漠戈壁[10]等风工程领域. 从晓春等[11]研究了防风网不同设置方式下对露天堆场起尘的影响, 结果表明, 防风网呈"口"型设置时, 抑尘效果最好. Basnet等[12]提出基于现场实验和数值模拟的方法监测围栏周围的积雪, 评估围栏对飘雪的阻挡效率, 从而改进围栏的设计. Lima等[13]研究了沙障孔隙率、高度、间距等参量对流过沙障阵列气流的影响并引入了成本函数, 结果表明使用0.5 m高的沙障成本最低. 综合台址实际工况, 本研究主要针对防风网、防风林等更易布置的风障设施(下文统称为风障), 在挡风效果上它们具有一定的相似性, 建模时可以近似看作多孔介质.

风障的抗风效果主要受其孔隙率、高度、面形等参数的影响[14]. 潘武轩等[15]基于数值模拟研究了不同孔隙率抑尘网对堆料周围湍流特性及堆料表面剪切力的影响, 结果表明抑尘网孔隙率为0.25时, 网后流场结构改变, 堆料表面剪切力最小. 张立群等[16]研究了防风抑尘网孔隙率对风沙遮蔽效果的影响, 孔隙率0.2–0.5的防风抑尘网中, 最佳孔隙率为0.2–0.3. Yu等[17]基于风洞实验研究了风障孔隙率以及高度对下游挡风效果的影响, 在孔隙率为0.75、0.63、0.56、0.36的风障中, 孔隙率为0.36的风障具有最高的防风效率(降低风速70%)和最长的防风距离(9倍网高的距离); 另外, 风障越高挡风效果越好. 在港口物料堆场工况中, 根据风洞试验资料通常推荐风障高度高于物料堆高1.1–1.5倍, 所以在实际工程应用中风障高度普遍高达20 m[18–22]. Wang等[23]研究了铁路两侧挡沙围栏的布置, 双层围栏比单层围栏的遮挡效果更优. 大量研究表明, 通过风障最优布置可以有效降低目标区域的风速. 由于应用工况的不同, 风障设计的最优参数并不完全相同. 在天文应用中, 风障不能遮挡天线视野, 需要与天线区域保持一定距离. 像QTT这类望远镜台址多位于山谷或盆地中, 台址地形具有一定的坡度, 与其他领域相对平坦的地形相比, 风障下游形成的风场结构也会有所不同.

本研究面向大口径、高精度望远镜主动抗风, 并以QTT台址为研究对象, 提出一种基于风障精确布置改善台址风环境的方法. 为了获得最优风障布置参数, 将着重考虑风障高度、孔隙率对天线区域挡风效果的影响. 通过最优参数设置南北组合风障, 验证最优风障设计对天线区域的挡风效果. 研究成果将为射电天文领域的天线主动抗风设计提供方法参考.

2 风场仿真数学模型

2.1 基本控制方程

风场仿真采用雷诺平均方法(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS). 对于自然风场可以将空气假设为低速、不可压缩的粘性牛顿流体. 风场的流动遵循质量守恒和动量守恒方程, 它们构成了数值模拟的基本控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0\,, \tag{1}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \\ &-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] + \\ &\frac{\partial}{\partial x_i}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) + S_i\,,\end{aligned} \tag{2}$$

式中ρ为空气密度, t为时间, i和j分别表示不同方向, x_i为i方向上的坐标, u_i为i方向上的速度,

p为压强, μ为流体粘度, δ_{ij}为Kronecker函数, $-\rho\overline{u_i'u_j'}$为雷诺应力, u_i'和u_j'分别为u_i和u_j对应的脉动分量、S_i为i方向上的动量源项.

针对不同的流体问题, 根据RANS方法发展出多种湍流模型, 本文采用精度高且较新的可实现k-ε模型[24], 其中k为湍动能、ε为耗散率.

2.2 多孔跳跃模型

本研究的风障具有一定的孔隙, 可以看作多孔介质, 在风场仿真中可以采用多孔跳跃模型. 多孔跳跃模型构建的原理是在动量方程中增加动量源项以模拟计算域中多孔材料对流体的流动阻力. 公式如下:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u_i + C_2\frac{1}{2}\rho|\boldsymbol{u}|u_i\right), \tag{3}$$

式中α为渗透率, C_2为惯性阻力系数, $\boldsymbol{u}$为流体速度.

动量源项为单位长度的压降:

$$S_i = -\frac{\Delta p}{\Delta n}, \tag{4}$$

式中Δp为风障前后的压降, Δn为风障的厚度.

参数α、C_2以及Δn应根据风障材料的属性设置. 在仿真中, 改变α对仿真结果的影响极小, 该参量可以设置为常数. 而C_2在没有实测数据的情况下可以采用如下经验公式设置[25–26]:

$$K = \frac{1-\beta}{\beta^2}, \tag{5}$$

$$C_2 = \frac{K}{\Delta n}, \tag{6}$$

其中K为压力损失系数, β为风障的孔隙率.

3 风场仿真模型构建

3.1 风障模型验证

为了确保构建的风障模型在风场仿真中具有可靠性, 将数值模拟结果与王泽涛[20]在大连理工风洞实验室进行的防风网减风试验数据进行对比. 风洞试验的防风网高0.5 m、厚0.0016 m、孔隙率分别为0.4和0.33. 按照风洞试验的防风网参数构建风障仿真模型以及仿真计算域, 分别进行有风障工况和无风障工况的风场仿真. 风障的挡风效果采用如下公式计算:

$$\varphi = \frac{v_{\mathrm{n}}}{v_{\mathrm{e}}}, \tag{7}$$

其中φ为挡风系数, 某位置挡风系数为负表明有风障工况与无风障工况的风向相反, 挡风系数绝对值越小挡风效果越好; v_{n}为有风障工况某位置的风速; v_{e}为无风障工况相同位置的风速.

风障风场仿真结果与风洞实测数据比较如图1所示, 其中距离以风障高度H为单位, 提取的是相对地面0.5 H高位置的风速数据. 横坐标表示风障下游的距离, 纵坐标表示风障下游的挡风系数. 从图1中可以看出, 风障模型风场仿真结果与风洞实测数据非常吻合. 比较仿真结果与风洞实测数据的平均误差, 孔隙率0.4的风障平均误差为3.7%, 孔隙率0.33的风障平均误差为6.1%, 由此说明构建的风障模型比较可靠.

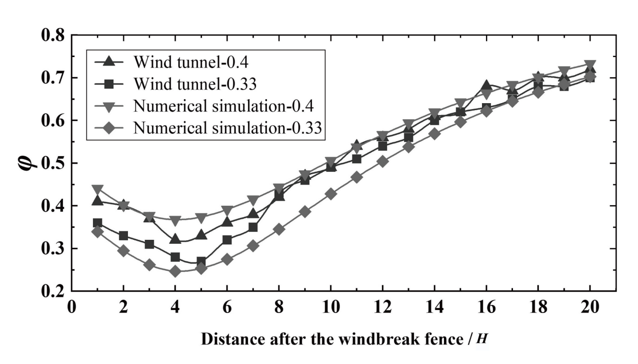


图 1　仿真与风洞实测结果比较

Fig. 1　Comparison of results between simulation and wind tunnel

3.2 QTT台址计算域模型构建

QTT台址地形如图2所示, 是一处四面环山的盆地, 地势南高北低, 海拔约为1760 m[3]. 在台址园区北部的谷口位置, 谷口底部与两侧山脊的高差在60 m左右, 谷口底部与天线位置的高差约60 m. 天线位置与天线南边最近山顶的高差在70 m左右. 台址区域的来风主要位于南北方向, 东西方向来风较少[7]. 本研究主要针对风障在南北方向上的抗风效果. 提取地形高程数据如图3所示, 天线位置为x轴0点(水平方向为x轴), y轴为相对海拔高度(竖直方

向为y轴). 由图中可以看出, QTT台址属于斜坡地形.

构建风场仿真计算域模型, 如图4所示, 同样水平方向为x轴, 天线位置为x轴0点, 竖直方向为y轴. 图中线框的上下左右边为计算域边界. 下底边界构建相对比较复杂, 先对台址高程数据进行预处理, 拟合出台址地形. 为了保障外部气流平稳过渡到台址地形区域内, 台址地形两侧分别做地形缓冲, 左侧地形缓冲500 m, 右侧地形缓冲1000 m. 地形缓冲外侧做水平延伸, 延伸长度均为1000 m. 计算域顶高设置为3000 m. 北方向来风, 左侧为风入口, 右侧为风出口; 南方向来风, 则左侧为风出口, 右侧为风入口. 在有风障工况中, 风障设置在$x = -600$ m (天线北风障)或600 m (天线南风障)的位置(下文简称−600或600 m位置). 计算域采用结构化网格划分, 台址实际地形区域的网格长度设置为4 m. 台址实际地形以外的区域是流场发展缓冲区, 不是主要关注的对象, 可以对网格数量进行适当降低, 故实际地形区域以外的网格采用“Exponential law”方法增长网格长度, 增长率为1.01, 最大网格长度为15 m. 计算域网格总数在61万以下.

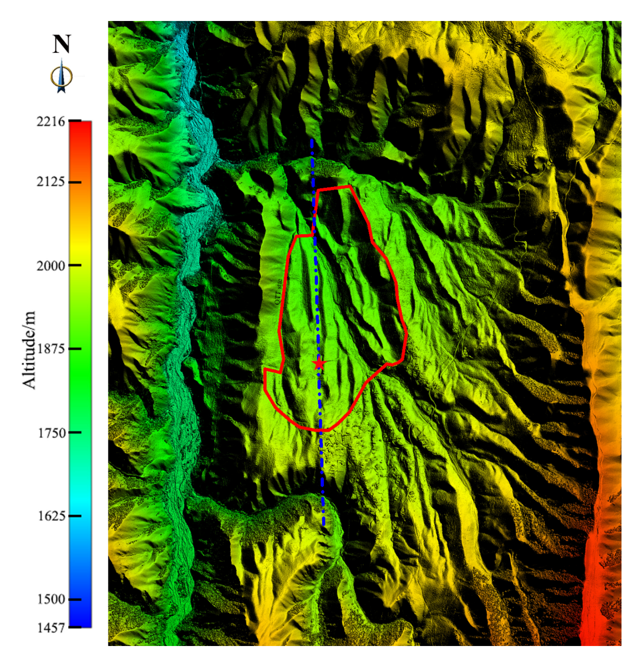


图 2　QTT台址地形. 五角星处为QTT位置; 红色实线是台址区域; 蓝色虚线是地形数据提取位置.

Fig. 2　The terrain of QTT site. The pentagram stands for location of the QTT; the red solid line indicates the site area; the blue dotted line is the location for extracting terrain data.

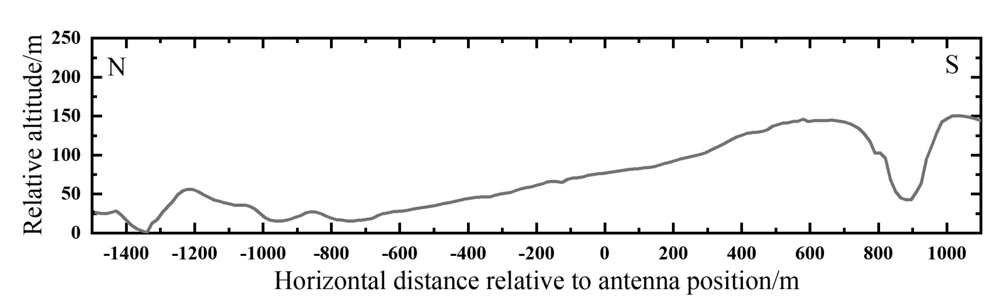


图 3　台址地形高程数据

Fig. 3　Terrain elevation data of the site

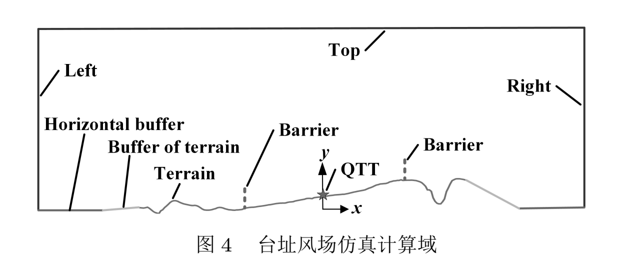


图 4　台址风场仿真计算域

Fig. 4　Computational domain of wind field simulation at the site

4　仿真结果及分析

风经过风障, 一部分风通过渗透作用流过风障, 一部分风向上抬升越过风障, 当风障高度和孔隙率达到一定界限时会在风障下游发生流动分离并产生回流, 同时会影响风障下游流速恢复的距离[27–28]. 基于QTT台址地形研究风障高度、孔隙率对下游区域挡风效果的影响.

4.1 风障高度对下游区域挡风效果的影响

针对风障高度对下游区域挡风效果影响的研究, 在计算域中分别设置风障高度$H = 0$、40、60、80、100、120 m进行风场仿真. 北方向来风, 风障设置在-600 m位置; 南方向来风, 风障设置在600 m位置. 风障孔隙率设置为0.4. 基于仿真结果制作风速云图, 如图5所示. 从云图中可以看出, 风障越高, 下游风速降低区域面积越大, 风速恢复的距离也越长, 该结果与水平地形工况的结果一致[17]. 由于台址地形南高北低, 同等高度的风障对于南方向来风的挡风效果要优于北方向来风.

提取相对地面$Y_{\mathrm{R}} = 30$、60、90 m高度的仿真结果, 计算风障挡风系数, 不同高度风障的挡风系数如图6所示. 图6 (a)中, 相对地面30 m高的位置, 风障下游的挡风效果都是先增强后减弱; 图6 (b)中, 相对地面60 m高的位置, 40 m高风障的挡风系数大于1, 这是由于风越过风障时, 会在风障的上部形成加速区, 该区域附近的风速会增强; 图6 (c)中, 在天线区域相对地面90 m高的位置, 40 m高的风障几乎没有挡风效果, 120 m高的风障挡风效果最好, 挡风系数为0.64; 图6 (d)中, 由于顺风向下游地势比较低, 风障下游挡风效果最佳位置随风障高度向后延伸; 图6 (e)中, 在相对地面60 m高的位置, 相对高度已超过40 m高的风障, 但由于地势的原因, 40 m高的风障在天线区域依旧能降低50%以上的风速; 图6 (f)中, 在天线区域相对地面90 m高的位置, 40 m高的风障挡风效果最弱, 挡风系数为0.68, 120 m的风障挡风效果最好, 挡风系数为0.21.

为了定量评价不同规格风障对天线区域挡风效果的影响, 以风在天线上产生力矩最小为标准(力矩大小: $L = rps$, s为受风面积, r为转轴长度, 风压$p = 1/2\rho v^2$), 得到一个新的评价指数, 定义为挡风指数:

$$R = \varphi_{30} \left|\varphi_{30}\right| r_{30} + \varphi_{60} \left|\varphi_{60}\right| r_{60} + \varphi_{90} \left|\varphi_{90}\right| r_{90}\,, \tag{8}$$

式中φ_{30}、φ_{60}、φ_{90}分别指r_{30}、r_{60}、r_{90}高度处的挡风系数. 挡风指数R的绝对值越小, 挡风效果越好.

计算不同高度风障在天线位置的挡风指数, 如表1所示. 从表1数据来看, 风障越高, 挡风效果越好, 但随着风障高度的增加, 挡风指数的增加不再明显, 特别是南方向来风, 100和120 m风障的挡风指数非常接近.

表 1 天线位置不同高度风障的挡风指数R
Table 1 Wind blocking index R of wind barriers with different heights at antenna position

Heights of the wind barrier (H)	Wind from north (N)	Wind from south (S)
40 m	151.96	56.30
60 m	127.93	20.82
80 m	101.25	9.95
100 m	77.14	6.35
120 m	58.69	5.45

4.2 风障孔隙率对下游区域挡风效果的影响

针对风障孔隙率对下游区域挡风效果影响的研究, 分别设置孔隙率$\beta = 0.1$、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6进行风场仿真. 基于实际台址地形对挡风效果的影响以及随风障高度增加的工程造价考虑, 北方向来风风障高度设置为80和100 m; 南方向来风风障高度设置为40和60 m. 同样提取相对地面30、60、90 m高的仿真结果, 计算风障挡风系数. 不同高度不同孔隙率风障的挡风系数如图7所示.

从图7中可以看出, 总体趋势是风障孔隙率越小下游的挡风效果越好. 当孔隙率达到一定界限时, 风障下游的分离区会发生回流(图中挡风系数为负说明有回流产生). 孔隙率越小, 则回流旋涡的范围越大, 回流区域相对天线的位置会发生改变, 在天线上产生的风力矩也会改变. 另外, 从图中还可以看出, 回流的产生除了与风障孔隙率相关, 还受风障高度和顺风向地形的影响. 在图7 (a)中, 风障高80 m, 孔隙率为0.2时, 在相对地面30 m的位置没有产生回流, 而图7 (d)中, 风障高100 m, 相同孔隙率, 相对地面30 m的位置产生了回流. 图7 (a)和图7 (g)比较, 北边布置的风障比南边布置的风障高1倍, 孔隙率相同时北方向来风在相对地面30 m的位置没有产生回流, 而南方向来风产生了回流. 不同高

度不同孔隙率风障的挡风指数如表2所示. 由图7和表2分析可知, 北方向来风产生的回流范围比较小, 80和100 m高风障孔隙率为0.1时, 在天线区域的挡风效果最优; 对于南方向来风, 产生回流的范围比较大, 均到达天线位置, 40 m高风障的最佳孔隙率为0.1, 60 m高风障的最佳孔隙率为0.2. 南方向和北方向来风各展示一组不同孔隙率风障的风场结构图, 如图8所示. 从图中可以看出, 随着孔隙率增大, 风障下游的回流区域在逐渐缩小, 流速也在逐渐恢复. 随着回流消失, 风障下游流场结构由旋涡流变为贴附流, 此刻渗透风强于越障风. 北方向来风, 孔隙率为0.3时, 风障下游回流消失, 该结果与类似工况的仿真结果一致[15]; 而南方向来风, 孔隙率为0.5时风障下游才没有回流.

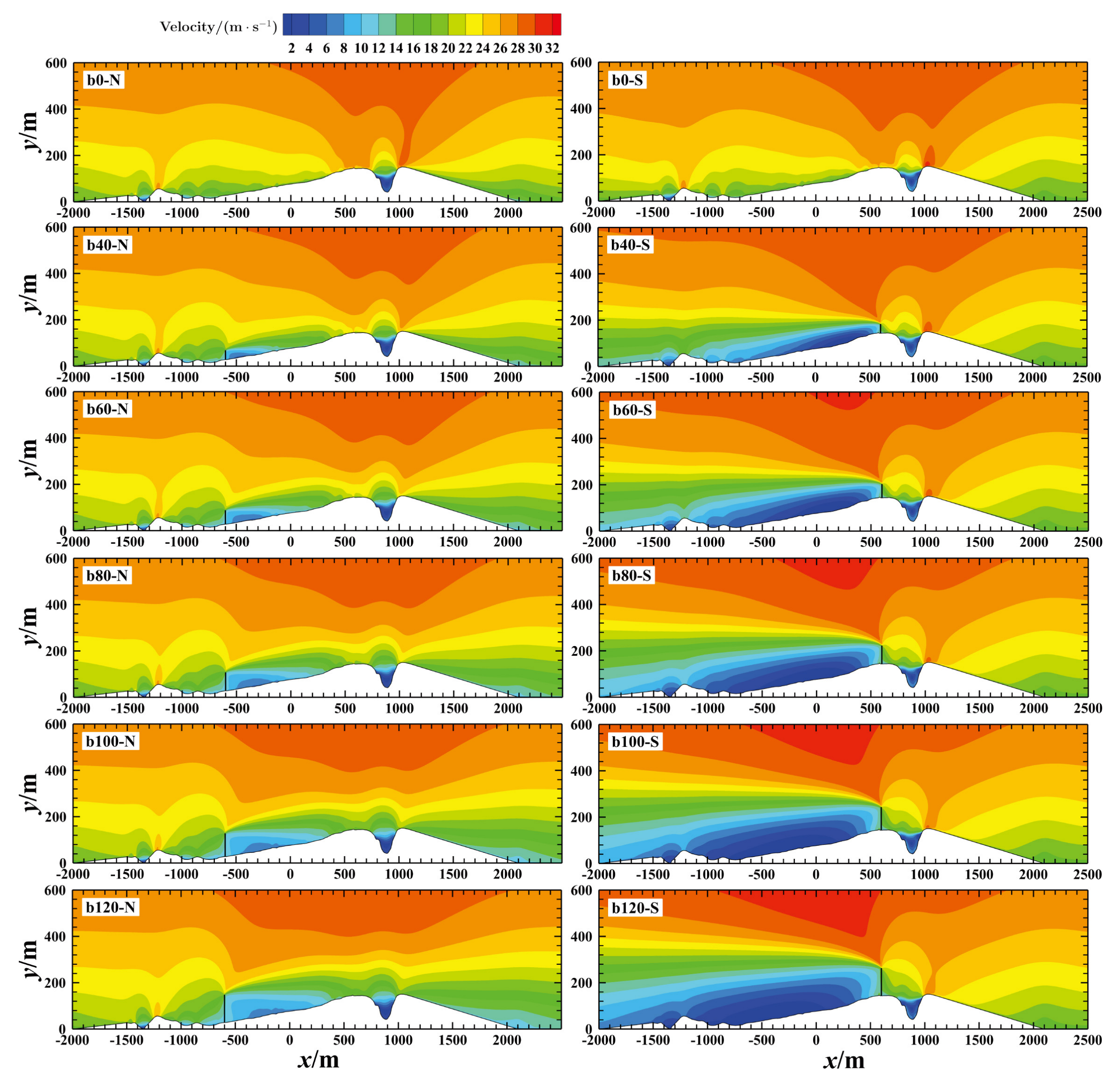


图 5 不同高度风障的风速云图. 以“b0-N”说明编号含义, “b0”表示风障高度, “N”表示风向.

Fig. 5 Wind speed cloud map of wind barriers with different heights. Taking “b0-N” to indicate the meaning of the number, “b0” indicates the wind barrier height, and “N” indicates the wind direction.

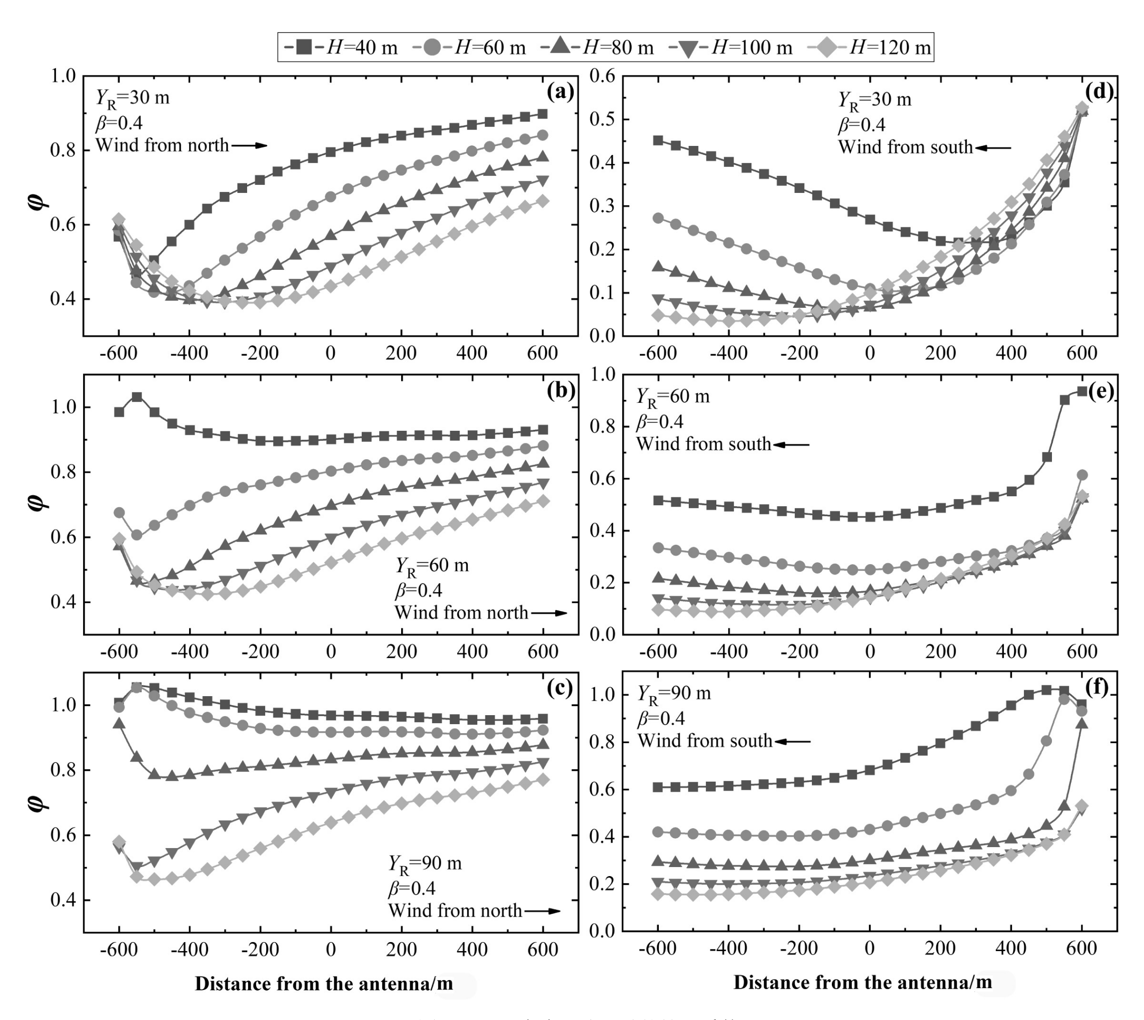


图 6　不同高度风障下游的挡风系数

Fig. 6　Downstream wind blocking coefficient of wind barriers with different heights

表 2　天线位置不同高度不同孔隙率风障的挡风指数

Table 2 Wind blocking index of wind barriers with different heights and porosities at antenna position

Heights \ Porosities	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
80 m (N)	50.31	62.89	80.28	101.25	122.42	140.96
100 m (N)	21.42	34.16	53.18	77.14	102.62	126.34
40 m (S)	6.42	13.13	27.69	56.31	95.72	128.86
60 m (S)	−2.35	−0.17	4.85	20.82	54.54	95.74

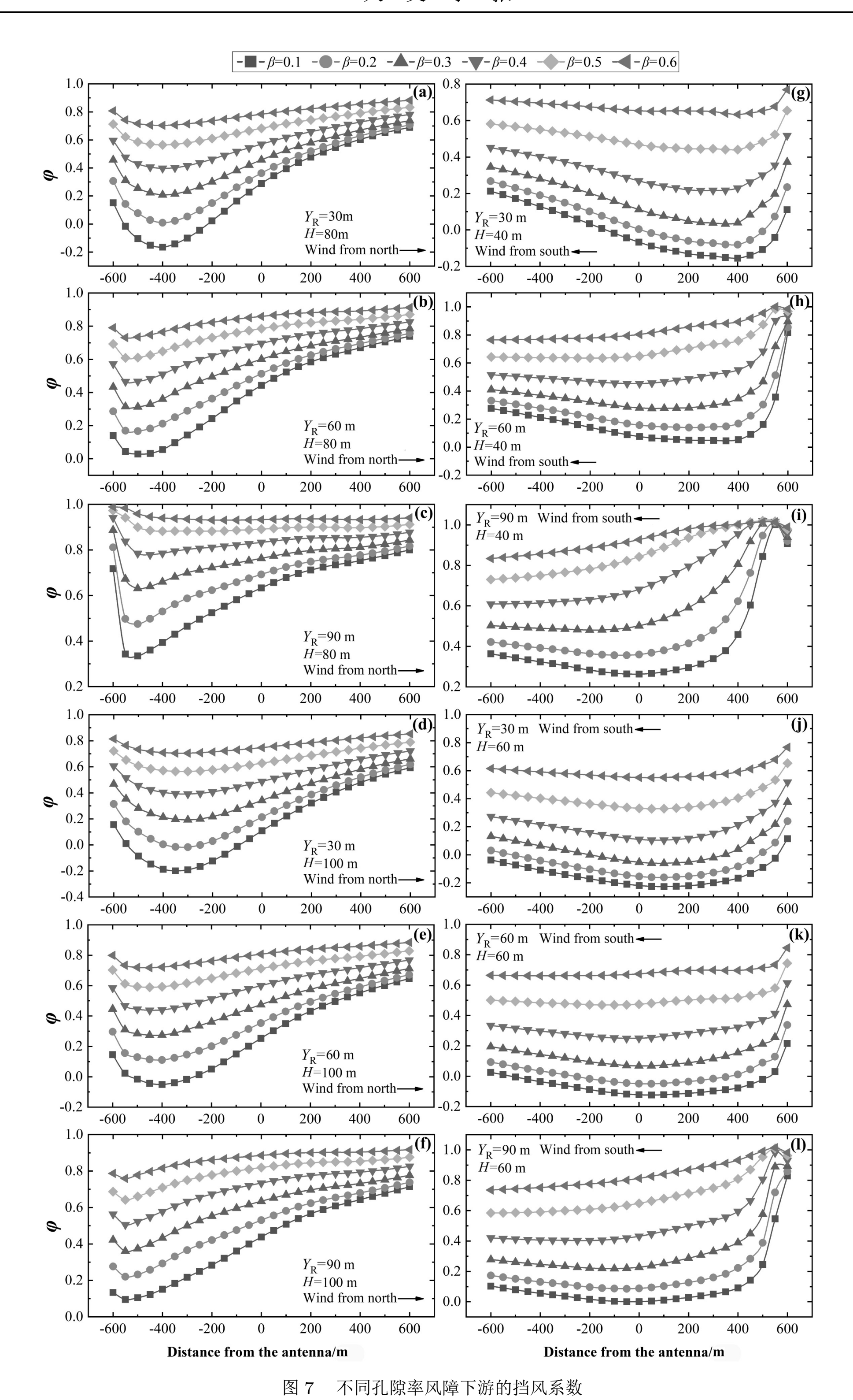


图 7　不同孔隙率风障下游的挡风系数

Fig. 7　Downstream wind blocking coefficient of wind barriers with different porosities

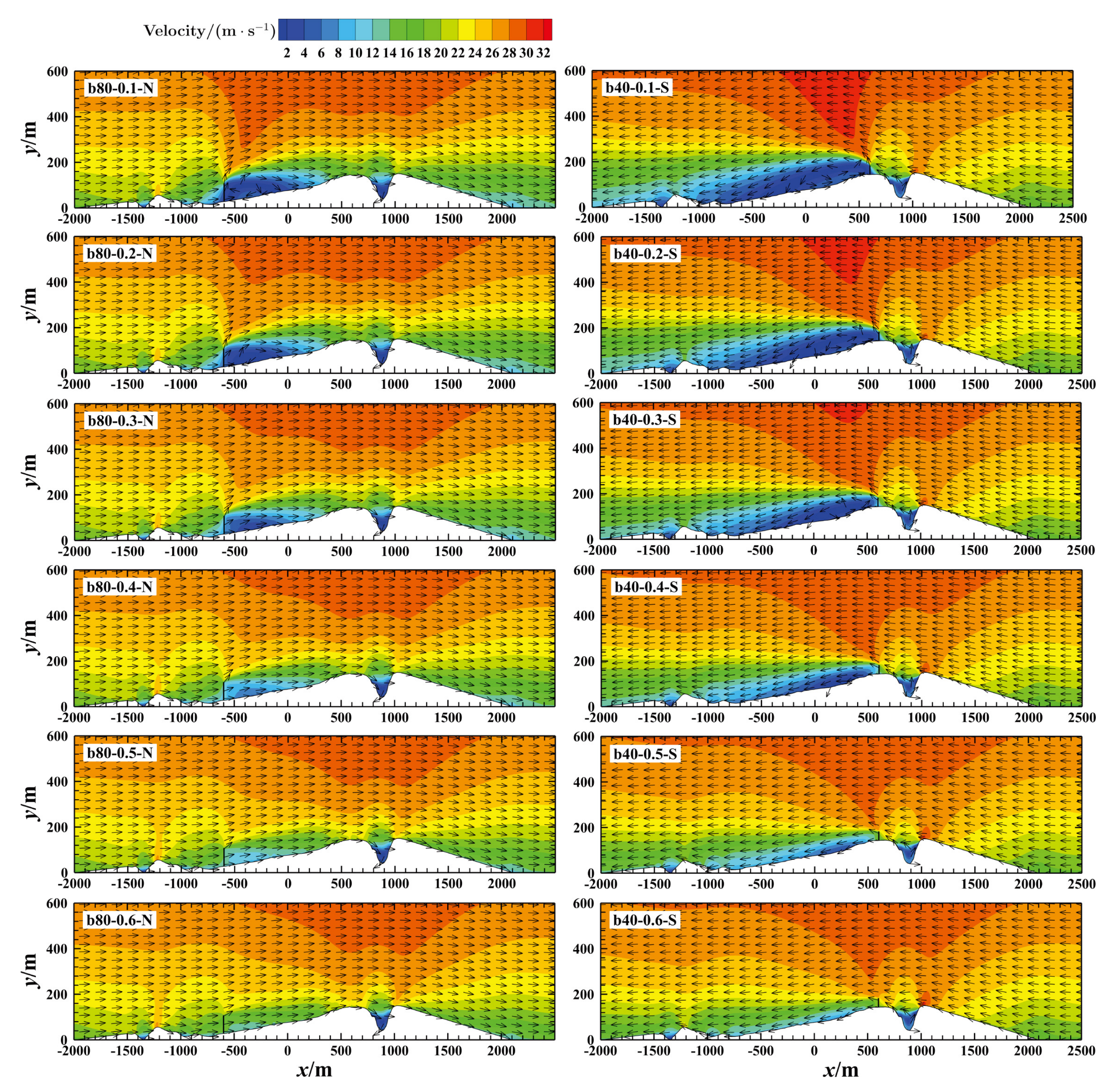


图 8 不同孔隙率风障的风场结构图. 以"b80-0.1-N"说明编号含义, "b80"表示风障高度, "0.1"表示风障孔隙率, "N"表示风向.

Fig. 8 Wind field structure of wind barriers with different porosities. Taking "b80-0.1-N" to indicate the meaning of the number, "b80" indicates the wind barrier height, "0.1" indicates the wind barrier porosity, and "N" indicates the wind direction.

4.3 基于优选参数组合的南北风障挡风效果评估

实际台址风环境下南方向和北方向都有来风且来风频率高. 在−600和600 m位置同时设置风障, 双风障参数基于单风障优选参数组合(高度和孔隙率)设置, 评估双风障的挡风效果. −600 m位置的风障高度设置为80 m; 600 m位置的风障高度设置为40 m. 风障孔隙率的组合为0.1–0.1、0.1–0.2、0.2–0.2、0.2–0.3, 前面和后面的数字分别代表北风

障和南风障孔隙率. 南北风障在相对地面30、60、90 m高的挡风系数如图9所示.

从图9中可以看出, 随着南北风障孔隙率的增加, 双风障的挡风效果在降低. 通过北方向来风0.1–0.1与0.1–0.2的组合比较、南方向来风0.1–0.2与0.2–0.2的组合比较可知, 沿顺风方向靠近上游的风障对挡风效果的影响占主导因素, 下游的风障对挡风效果的影响较弱. 由于斜坡地形的影响, 南北风障对南方向来风的挡风效果较好, 对北方向来风的挡风效果较弱. 计算风障不同孔隙率组合的挡风指数如表3所示. 由图9和表3分析可知, 0.1–0.1组合的表现最优. 天线区域相对地面90 m高的位置, 北方向来风挡风系数为0.58, 南方向来风挡风系数为0.23. 但0.1–0.2与0.1–0.1组合相比, 也可以考虑使用. 北方向来风, 两者的挡风指数几乎相同; 而南方向来风, 0.1–0.2组合的挡风指数略高于0.1–0.1组合. 0.1–0.1与0.1–0.2组合的风场流线如图10所示. 从图中可以看出, 对北方向来风, 两种组合在天线区域形成的流场结构相同; 对南方向来风, 0.1–0.1组合形成的回流旋涡范围比0.1–0.2组合略大.

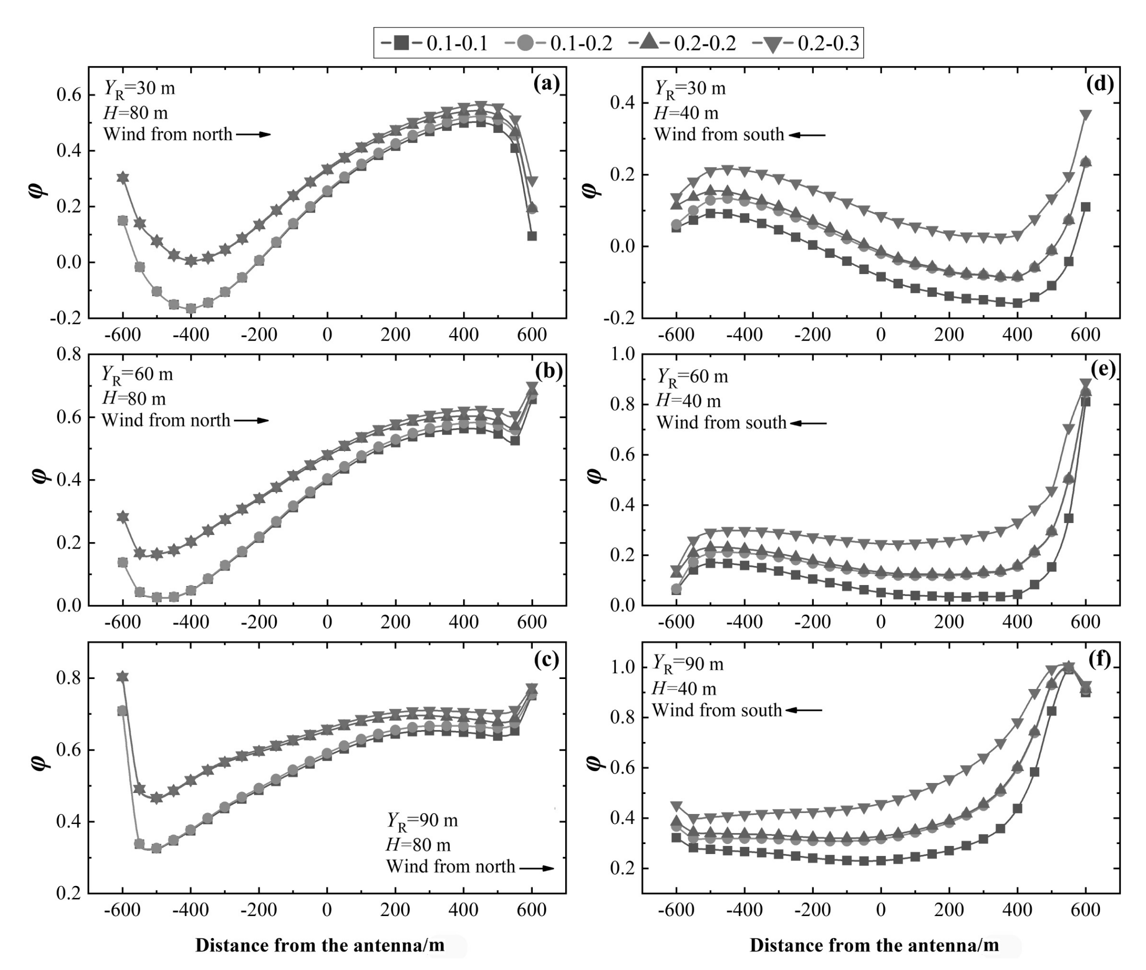


图 9　南北风障不同孔隙率组合的挡风系数. 图例中前面的数字代表北风障孔隙率, 后面的数字代表南风障孔隙率.

Fig. 9 Wind blocking coefficient of south and north wind barriers with different porosity combination. The front number in the legend represents the north wind barrier porosity, and the back number represents the south wind barrier porosity.

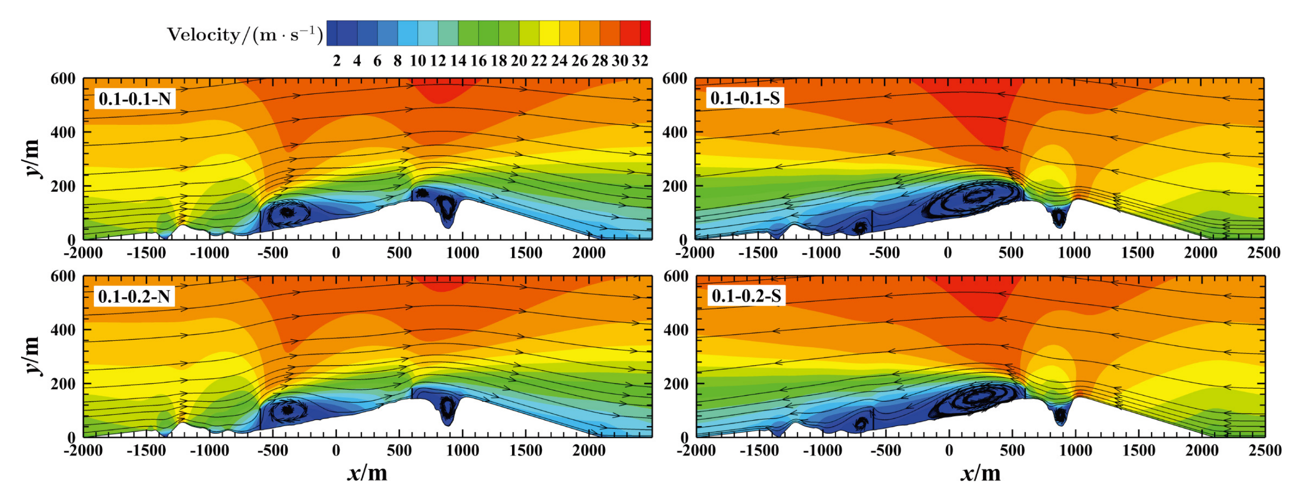


图 10　南北风障风场流线图. 以“0.1–0.1-N”说明编号含义, “0.1–0.1”中的前后数字分别代表北风障孔隙率和南风障孔隙率, “N”表示风向.

Fig. 10　Wind field streamline of wind barriers in the south and north. Taking “0.1–0.1-N” to indicate the meaning of the number, the front and back numbers in “0.1–0.1” represent the north wind barrier porosity and the south wind barrier porosity respectively, and “N” indicates the wind direction.

表 3　南北风障的挡风指数

Table 3　Wind blocking index of wind barriers in the south and north

Combined porosities	Wind from north (N)	Wind from south (S)
0.1–0.1	41.91	4.74
0.1–0.2	43.21	9.99
0.2–0.2	55.07	10.69
0.2–0.3	56.60	22.64

5　结论

本研究以QTT台址为例, 基于数值模拟方法开展大口径、高精度望远镜台址风障布置最优参数研究. 构建了风障仿真模型并与风洞实测数据比较, 风障孔隙率取0.4时的平均误差为3.7%, 风障孔隙率取0.33时的平均误差为6.1%, 可知构建的风障模型准确度高. 基于台址地形高程数据构建了台址计算域模型, 并在计算域中设置不同高度、不同孔隙率的风障进行南方向、北方向来风的风场仿真.

$H = 0$、40、60、80、100、120 m高度下的风障仿真结果表明, 风障高度越高风障下游的挡风效果越好. 由于QTT台址地形南高北低, 在天线北方向设置的风障高度要比南方向高. 同等风障孔隙率, 南方向来风时40 m风障在天线位置的挡风指数是56.30; 北方向来风时120 m风障在天线位置的挡风指数是58.69.

孔隙率$\beta = 0.1$、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6的风障仿真结果来看, 总体趋势是孔隙率越小风障下游的挡风效果越好. 当孔隙率达到一定界限时会在风障下游产生回流旋涡, 孔隙率越小回流旋涡范围越大, 相对天线的位置也会发生改变. 因此, 在一定风障高度和来风方向下, 风障孔隙率最小不一定天线位置挡风效果最优. 如南方向来风, 若天线位置挡风效果最好, 40 m高风障的最优孔隙率为0.1, 60 m高风障的最优孔隙率为0.2.

基于单风障高度、孔隙率优选参数组合设置南北风障, 仿真结果表明在确定的80–40 m高度下, 0.1–0.1孔隙率组合的风障表现最优, 北方向来风挡风系数为0.58, 南方向来风挡风系数为0.23. 0.1–0.2组合在南方向来风的挡风性能略弱于0.1–0.1组合, 也可以考虑使用. 双风障中, 上游的风障对天线区域的挡风效果占主导作用, 下游风障也具有一定作用, 但贡献相对较小.

基于单风障高度、孔隙率优选参数组合设置南北风障, 经评估优选参数组合的风障在天线区域的挡风效果依旧最优, 从而说明单项最优参数在多风障布置中可以组合. 因此, 本研究基于台址斜坡

地形开展的不同高度、不同孔隙率风障的系列仿真试验数据, 能够为大口径、高指向精度射电望远镜台址风障优化设计的工程实践提供参考. 随着台址更多风传感器的布设, 在获取台址更为全面的风场特性基础上, 下一阶段将开展风障横风向布设宽度、顺风向布设宽度以及不同风向角等参量对下游挡风效果影响的研究.

参考文献

[1] Prestage R M, Constantikes K T, Balser D S, et al. SPIE Proceedings of Ground-based Telescopes. SPIE, 2004, 5489: 1029

[2] Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. Proceedings of the IEEE, 2009, 97: 1382

[3] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 783

[4] 范钦红, 范生宏, 左营喜, 等. 天文学报, 2010, 51: 210

[5] MacA Thomas B, Schafer J T, Sinclair M W, et al. IAPM, 1997, 39: 54

[6] Gawronski W. IAPM, 2007, 49: 40

[7] He F L, Xu Q, Wang N, et al. RAA, 2020, 20: 199

[8] 王春雨. 防风抑尘网的优化设计对散料堆起尘变化的影响研究. 天津: 天津商业大学, 2020: 21-63

[9] 薛万新, 韦振勋. 公路, 2014, 59: 217

[10] He L Y, Li D L, Chen L. Sciences in Cold and Arid Regions, 2012, 4: 249

[11] 丛晓春, 曹世青, 陈志龙, 等. 环境工程, 2011, 29: 67

[12] Basnet K, Constantinescu G, Muste M, et al. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 141: 04014136

[13] Lima I A, Araújo A D, Parteli E J R, et al. NatSR, 2017, 7: 45148

[14] Li B, Sherman D J. AeoRe, 2015, 17: 33

[15] 潘武轩, 何鸿展, 宋翀芳, 等. 中国环境科学, 2015, 35: 1638

[16] 张立群, 许振海, 董捷, 等. 铁道科学与工程学报, 2017, 14: 957

[17] Yu Y P, Zhang K C, An Z S, et al. JMouS, 2020, 17: 2485

[18] 沈熹. 交通环保, 1995, 16: 22

[19] 陈凯, 朱凤荣, 钮珍南. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42: 636

[20] 王泽涛. 防风网风速折减效果及风荷载体型系数风洞研究. 大连: 大连理工大学, 2011: 7-26

[21] 马高峰. 防风网支护结构优化计算与风振分析. 大连: 大连理工大学, 2012: 1-5

[22] 白学花. 导流型防风网后的颗粒运动行为及受力分析. 青岛: 青岛科技大学, 2015: 10-13

[23] Wang T, Qu J, Ling Y, et al. Journal of Arid Land, 2017, 9: 888

[24] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. Computers & Fluids, 1995, 24: 227

[25] 徐洪涛, 何勇, 廖海黎, 等. 安全与环境学报, 2010, 10: 70

[26] Guo L, Maghirang R G. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6: 110

[27] Plate E J. AgMet, 1971, 8: 203

[28] Raine J K, Stevenson D C. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1977, 2: 159

Optimal Design of the Wind Barrier for Large-aperture and High-precision Radio Telescope Site Based on Numerical Simulation

HE Fei-long[1,2] XU Qian[1,3,4] WANG Na[1,3,4] LI Lin[5] HUANG Shi-yi[6]

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)
(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)
(3 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)
(4 Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011)
(5 School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046)
(6 School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637002)

Abstract With the increase in aperture and observation frequency of radio telescopes, there is a growing demand for enhanced pointing accuracy. However, telescope is operated at the field station, and the influence of wind disturbances on telescope pointing accuracy cannot be ignored in high frequency observation. Due to the time-varying characteristics of wind disturbances, the existing wind resistance methods cannot guarantee the effective observation time of large aperture and high pointing accuracy telescope in high frequency. Therefore, a method to improve the wind environment of the site based on

the precise arrangement of wind barriers is proposed. The wind barrier simulation model is built, and the average error of the two porosity wind barriers is 3.7% and 6.1% respectively by comparing the simulation results with the measured data of the wind tunnel, which ensures the reliability of the wind barrier model. The QiTai radio Telescope (QTT) site in Xinjiang is taken as an example. The computational domain model is developed based on the slope terrain of the QTT site, and a series of wind field simulation tests are conducted to investigate the impact of different heights and porosities of a single wind barrier on downstream wind protection effectiveness. The parameters for simulating the north-south wind barrier are determined based on an appropriate height and optimal porosity. The results indicate that combining the determined height with a porosity of 0.1–0.1 yields the most effective wind reduction in the antenna area, with south winds experiencing a decrease in speed by over 75%.

Key words telescopes, methods: numerical, site, wind barrier, wind field regulation